

Comparing the Optical Film and the Acoustic Middle Layer

Xiaoguang Sun

Guangzhou College, South China University of Technology, Guangzhou
Email: sunxiaoguang1983@163.com

Received: Oct. 19th, 2012; revised: Oct. 27th, 2012; accepted: Nov. 11th, 2012

Abstract: The phenomenon of increased reflection and increased transmission bath of optical film and acoustic middle layer was compared and analyzed. The concept sound path and sound path difference was proposed, and through the sound path difference, the acoustic middle layer problem was analyzed. Analysis shows that the mathematical relationships between the thickness and the wavelength are the same in bath of optical film and acoustic middle layer. The physical properties of light and sound are symmetrical when they pass through the middle layer. And the practical application of optical film and acoustic middle layer is also symmetrical.

Keywords: Sound Intensity Transmission Coefficient; Sound Intensity Reflection Coefficient; Thin Film Interference; Increase Reflection Film; Increase Transmission Film

光学薄膜与声学中间层比较

孙小广

华南理工大学广州学院, 广州
Email: sunxiaoguang1983@163.com

收稿日期: 2012年10月19日; 修回日期: 2012年10月27日; 录用日期: 2012年11月11日

摘要: 对比分析了光学薄膜与声学中间层的增反和增透现象, 提出了声程和声程差的概念, 并通过声程差分析了声波垂直入射中间层的问题。分析表明: 光学增反膜和增透膜与声学增反层和增透层的厚度与其中光波或声波的波长有相同的数学关系, 光和声在通过中间层介质时具有对称的物理特性, 从而使得光学薄膜与声学中间层又具有对称性的实际应用。

关键词: 声强透射系数; 声强反射系数; 薄膜干涉; 增反膜; 增透膜

1. 引言

波动光学是大学物理课程的重要部分, 主要内容有光的干涉、光的衍射和光的偏振。与波动光学相比较, 目前国内的大学物理课程对于声的讨论很少, 大多数教材中几乎没有关于声的内容。这些年, 笔者所在的声学硕士点, 在对硕士研究生进行入学面试时发现, 有不少顺利通过笔试进入面试的考生对于声的认识非常缺乏, 更有甚者不曾听说过分贝的概念。

其实, 在古代科学史上, 声学就是物理学中最为发展、内容最为丰富、理论最为完备的学科之一^[1]。

今天, 声与我们更是息息相关, 它已经广泛地被应用于工业、农业、军事、科技、文化艺术等各个领域。了解和掌握一定的声学知识对于本科大学生是非常必要的, 将声与光进行比较分析, 对于培养大学生科学的思想方法也是很有意义的。

2. 光学薄膜

在不同的介质中, 由于光的传播速度不同, 即使光通过相同的几何路程, 所用的时间也不同。或者说, 在不同介质中, 相同的几何路程差却对应着不同的相

位差。波动光学中定义光程为“光在介质中传播的几何路程与介质折射率的乘积”，把光在介质中通过的几何路程折算到真空中去，巧妙地解决了各介质中光通过的几何路程不可比的问题。

光在两种介质的界面上发生反射时，在某些情况下，反射光的相位与入射光的相位相反，即光在反射时发生了相位 π 的突变，称为半波损失。一般情况下，反射光的相位突变问题比较复杂，它与光的入射角和偏振态及物质的性质有关。但在透明介质中，当光从光疏媒质进入光密媒质，并且是正入射时，反射波一定有半波损失^[2]。

假定光从空气中向一薄膜垂直入射，薄膜的厚度为 d ，空气的折射率为 $n_1 = 1$ ，薄膜的折射率为 $n_2 > 1$ ，如图1所示。

在薄膜的入射侧面，考虑反射光1与透射光3之间的叠加。由于有半波损失，当 $2n_2d + \lambda/2 = m\lambda$ ，其中 $m = 1, 2, 3 \dots$ 时，反射光1与透射光3干涉加强。即如果薄膜的厚度满足下式：

$$d = (2m - 1) \frac{\lambda}{4n_2}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

式中 λ 为光在真空(空气)中的波长，式中 m 取正整数。将(1)式写成：

$$d = (2m - 1) \frac{\lambda_2}{4}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

式中 λ_2 为光在薄膜中的波长。此时，该光学薄膜为增反膜。

在薄膜的透射侧面，考虑透射光2与透射光4之间的叠加。当 $2n_2d = m\lambda$ ，其中 $m = 1, 2, 3 \dots$ 时，透射光2与透射光4干涉加强。即如果薄膜的厚度满足下式：

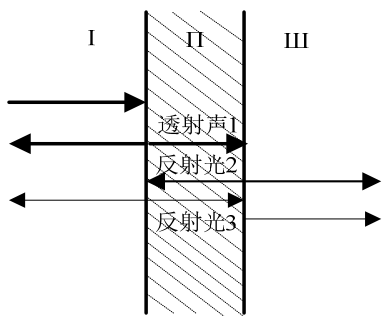


Figure 1. Optical film
图1. 光学薄膜

$$d = 2m \frac{\lambda_2}{4}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

此时，该光学薄膜为增透膜。

3. 声学中间层

假定在特性阻抗为 $R_1 = \rho_1 c_1$ 的无限大均匀介质中有一厚度为 D 、特性阻抗为 $R_2 = \rho_2 c_2$ 的中间层媒质， ρ 和 c 分别代表两媒质的密度和声速。一列平面声波垂直入射到中间层界面上时，一部分发生反射回到媒质中，另一部分透入中间层，当声波行进到中间层的另一界面上时，由于特性阻抗的改变，又会一部分反射回中间层，其余部分就透入中间层后面的媒质中去。声在中间层的反射和透射情况如图2所示^[3]。

声学中，声压透射系数定义为透过中间层的声压与入射声波的声压之比。考虑平面声波垂直入射中间层的情况，利用声学边界条件可以得到声压透射系数的表达式为：

$$t_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2}{[4 \cos^2 k_2 D + (R_{12} + R_{21})^2 \sin^2 k_2 D]^{1/2}} \quad (4)$$

式中， $R_{12} = R_2/R_1$ ， $R_{21} = R_1/R_2$ ， $k_1 = \omega/c_1$ ， $k_2 = \omega/c_2$ ， k_1 和 k_2 分别为两媒质的波数， ω 为声波的圆频率。由此可得该声学中间层对于该声波的声强透射系数为：

$$t_I = \frac{4}{4 \cos^2 k_2 D + (R_{12} + R_{21})^2 \sin^2 k_2 D} \quad (5)$$

则声强反射系数为：

$$r_I = 1 - t_I \quad (6)$$

由(5)式及(6)式可以看出声波通过中间层时的反射波及透射波的强度不仅与两种媒质的特性阻抗

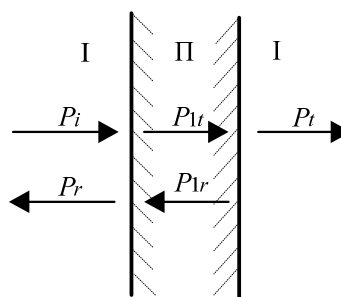


Figure 2. Acoustic middle layer
图2. 声学中间层

有关，而且还与中间层的厚度跟其中传播的波长之比 D/λ_2 有关。类似于光从真空(空气)向 $n_2 > 1$ 的薄膜入射的情况，假定 $R_2 > R_1$ ，由(5)(6)两式可知，在 $k_2 D = (2m-1)p/2$ 时，即：

$$D = (2m-1)\frac{\lambda_2}{4}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

$t_l \approx 0$ 。也就是说，中间层厚度为其中传播的声波 $1/4$ 波长的奇数倍时，中间层完全隔绝了声波，中间层为声学“增反层”。

当 $k_2 D = m\pi$ ， $m = 1, 2, 3 \dots$ 时，即：

$$D = 2m\frac{\lambda_2}{4}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

此时，中间层的厚度为半波长的整数倍， $t_l = 1$ ，声波完全透过中间层，好像中间层不存在一样，中间层为声学“增透层”，这就是超声技术中的半波透声片原理。

4. 声程与声程差

与光类似，相同的声几何路程差也对应不同的相位差。在波动光学中，把光在介质中通过的几何路程折算到真空中去是可行的，因为光在真空中的传播速度最快。

然而在声学中，难以找到像真空这样的介质作为参考标准，因为没有有一个绝对的声速最快或最慢的介质。其实，我们不必寻找像真空这样的介质作为“绝对”意义上的参考介质，只需要结合研究的问题提出相对声程的概念。

如图 2 所示，声波在介质 I 中的波长为 $2\pi c_1/w$ ，在介质 II 中的波长为 $2\pi c_2/w$ 。假定 $c_2 > c_1$ ，以介质 II 作为参考，声波在介质 II 中的波长为 λ_2 ，在介质 I 中的波长为 λ_1 ，有：

$$\lambda_1/c_1 = \lambda_2/c_2 \quad (9)$$

如果称声波在介质 II 中传播的距离 r_2 为声波在介质 II 中的声程，则声波在介质 I 中传播的距离也为 r_2 时，其声程为 $r_1 = r_2 c_1/c_2$ 。有了声程的概念，声程差的概念也就随之建立。

参考图 1，考虑声从 $R_1 = \rho_1 c_1$ 的无限大均匀介质向 $R_2 = \rho_2 c_2$ 的中间层入射，反射声波有半波损失的情况，容易得到，中间层为增反层的厚度应满足：

$$D = (2m-1)\frac{\lambda_2}{4}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

同样，在上述条件下，可以得到中间层为声学增透层的厚度条件为：

$$D = 2m\frac{\lambda_2}{4}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (11)$$

5. 结论

在光从光疏媒质向光密媒质入射而被反射时，反射光有半波损失。同样，当声从波疏媒质向波密媒质入射而被反射时，反射声也有半波损失。

光学增反膜和增透膜的厚度，都是对于一定的波长而言的，对于不同波长的光，其增反膜和增透膜的最小厚度不同。同样，声学增反层和增透层的厚度，也都是对于一定的波长而言的，对于不同波长的声，其增反层和增透层的最小厚度也不同。

在均匀光学介质中置一光密光学薄膜，或是在均匀的声学介质中置一波密中间层时，光学增反膜与声学增反层的最小厚度都是其中波长的 $1/4$ ，光学增透膜与声学增透层的得最小厚度都是其中波长的一半。

无论是光学薄膜还是声学中间层，当它对某一波长的光或声是增反膜或增透层时，它对该波长的光或声一定是减透膜或减透层，这是能量守恒的表现，也是能量守恒的需要。

在提出声程及声程差的概念后，对于声中间层为增反层或增透层的分析方法与波动光学中薄膜为增反膜和增透膜的分析方法取得一致。

光是电磁波，声是机械波。由于描述两者的波动方程的相似性，使得两者在一些具体的问题中具有相同形式的数学解，从而具有对称的物理性质或是具有对称性的实际应用。

把握光声对称性，一方面可以是学生更加容易掌握相关的知识，另一方面也能使学生感受对称性思想和掌握对称性的分析方法。

参考文献 (References)

- [1] 戴念祖. 中国声学史[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 1994: 214-220.
- [2] 邓文基, 罗仁俊, 李绍新等. 大学物理[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003: 225-228.
- [3] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 214-220.